

Protecciones de presas mediante repiés de escollera y bloques en forma de cuña

*Rafael Morán, Ricardo Alves y Miguel Ángel Toledo**

*Fernando Salazar, Antonia Larese y Javier San Mauro***

**Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética*

Universidad Politécnica de Madrid

***Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE)*

rmoran@caminos.upm.es, rmonteiro@caminos.upm.es, matoledo@caminos.upm.es

fsalazar@cimne.upc.edu, antoldt@cimne.upc.edu, jsanmauro@cimne.upc.edu

1 Introducción

La tecnología de protecciones de presas de materiales sueltos ha experimentado un gran avance en las últimas décadas. El estado del arte de protecciones incluye tipologías muy diferentes en función del origen del daño al que se pretende hacer frente, el grado de protección deseado y de las características específicas de la presa a proteger, entre otras.

La bibliografía sobre este tema es amplia, con estudios normalmente enfocados a la protección frente al sobrevertido, por ser ésta la causa principal de rotura de las presas de materiales sueltos. En la actualidad, el Department of Homeland Security del gobierno norteamericano a través de la Federal Emergency Management Agency, está redactando una monografía sobre protecciones de presas frente al sobrevertido titulada “*Overtopping Protection for Dams*” que pretende identificar tipologías de protección eficaces, basándose en experiencias exitosas de aplicación en casos reales.

En este artículo se van a tratar dos tipos de protecciones de carácter muy diferente: las protecciones tipo repié y las protecciones mediante bloques prefabricados en forma de cuña (en adelante, BFC).

En el caso de las protecciones tipo repié, aplicables a presas de materiales sueltos con espaldón de aguas abajo de escollera, se realiza una breve descripción del estado del arte de la tecnología y de sus aplicaciones así como de la innovación conseguida en este campo a partir de las investigaciones desarrolladas en la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en colaboración con el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en la Ingeniería (CIMNE), en el marco del proyecto de investigación del Plan Nacional denominado *EDAMS*, y cuyo resultado directo ha sido la tesis doctoral titulada “*Mejora de la seguridad de las presas de escollera frente a percolación accidental mediante protecciones tipo repié*” (Morán, 2013).

En la parte dedicada a la protección mediante BFC's se describe la tecnología, sus posibilidades de utilización dentro de la ingeniería de presas y se presenta el caso de la presa de Barriga (Burgos), como primera aplicación mundial de esta tecnología para el diseño de un aliviadero de servicio sobre el propio cuerpo de una presa de materiales sueltos en explotación.

2 Investigación sobre protecciones tipo repié

2.1 Descripción de la solución y antecedentes

A lo largo de la historia de la ingeniería civil, los repiés formados por materiales sueltos de elevada permeabilidad han sido profusamente utilizados como técnica de estabilización de taludes frente al deslizamiento en masa, bien sea de terraplenes, desmontes o de taludes naturales. A la capacidad de sostenimiento del repié, debido al peso añadido en la zona inferior del talud y a su elevado ángulo de rozamiento interno, se une su cualidad como material drenante, evitando el desarrollo en su interior de presiones intersticiales que reducen las tensiones efectivas de su esqueleto sólido y, por tanto, su resistencia al deslizamiento.

El uso de los repiés como técnica de estabilización de presas de escollera sometidas a *percolaciones extremas* tiene una diferencia fundamental respecto a lo descrito para las estabilizaciones de taludes con repiés convencionales. Ésta se basa en que estas protecciones se diseñan para asegurar la estabilidad del conjunto espaldón-repié cuando se produce una percolación extrema en su interior. Esta percolación, normalmente motivada por causas accidentales, puede provocar de forma extemporánea la circulación de caudales de agua anormalmente elevados a través del espaldón y del repié, saliendo hacia aguas abajo por el propio talud del repié (Figura 1). Ello implica que el conjunto presa-repié se vea sometido a presiones intersticiales y a gradientes hidráulicos que tienen una influencia directa en la disminución de la resistencia al deslizamiento y en el potencial arrastre de las partículas que lo integran.

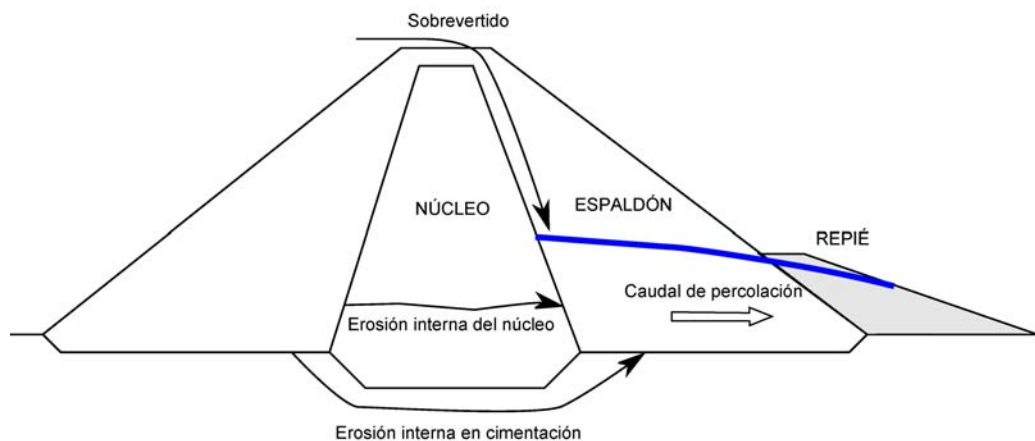


Figura 1. Esquema de posibles causas de percolación extrema y de la protección tipo repié

La causa de la, así llamada, percolación extrema, pueden estar originadas por distintos motivos: el sobrevellido por coronación, debido a una capacidad insuficiente de los órganos de desagüe de la presa; o un proceso de erosión interna del núcleo o de la propia cimentación de la presa en una fase de desarrollo avanzada. Según los datos de la International Commission on Large Dams (ICOLD 1995) el 70% de las causas de rotura o avería grave en presas de materiales sueltos en el mundo están dentro de las que se han indicado con anterioridad.

En caso de no tomar ninguna medida de protección, el proceso de rotura del espaldón se traduce en una eliminación progresiva del material desde el pie de presa hacia aguas arriba, motivado por una combinación de mecanismos de rotura, principalmente deslizamiento en masa, erosión por arrastre y erosión interna. El progreso de la rotura del espaldón es muy rápido en comparación con el que se produciría en un material suelto de tipo cohesivo y, una vez desarrollado por completo, puede provocar la eliminación del espaldón de escollera, quedando desguarnecido el elemento impermeable, bien sea éste núcleo o pantalla artificial. Una vez iniciada la rotura del elemento impermeable, comienza la rotura de la presa, quedando la onda de rotura determinada de forma directa por la evolución de los daños en dicho elemento.

De cara a la protección, una conclusión importante que se puede extraer del análisis del modo de fallo de las presas de escollera es que al impedir la rotura del espaldón de aguas abajo se puede evitar o, en el peor de los casos, retrasar sensiblemente, la rotura completa de la presa. De esta forma, la presa, tras producirse la avería, sólo podría romperse tras una erosión interna intensa, con lavado del material del filtro, del núcleo o de la propia cimentación, procesos que necesitan para su evolución de un tiempo de incubación más amplio.

En el mundo ya se ha comenzado a aplicar la protección tipo repié a presas existentes para aumentar su seguridad en situaciones accidentales. Los países que han iniciado ya esta práctica son, fundamentalmente,

Suecia y Noruega, al tener por un lado un gran número de presas de escollera y, por otro, unos estándares sociales y económicos elevados. En estos países existe una elevada producción de energía hidroeléctrica obtenida a partir de aprovechamientos que utilizan presas de esta tipología, constituyendo éstas un valor estratégico dentro de la economía nacional. Así, en Suecia, existen normativas sobre seguridad de presas (SVENSK ENERGI 2007, Nilsson 2004) que establecen que una presa de materiales sueltos de alto riesgo potencial, debe ser capaz de soportar la máxima filtración a la que pueda verse sometida durante su vida útil, incluso en escenarios accidentales. A tal efecto, se recomienda que esta protección se lleve a cabo mediante un repié de escollera con tamaño de piedra resistente al arrastre por dicho caudal. En este sentido, la normativa noruega sobre seguridad de presas (Ministry of Petroleum and Energy. Energy Water Resources Department. 2000) establece en su sección 4.7. Apartado f), dedicado al talud de aguas abajo y repié de presas de materiales sueltos:

“El talud de aguas abajo y el pie de presa tendrán suficiente capacidad drenante para soportar elevados caudales de percolación como resultado de situaciones accidentales o averías en la presa. La transición en el interior del espaldón debe estar diseñada y construida para prevenir que el material de su interior sea arrastrado”

En la misma sección, en el apartado i), dedicado al resguardo entre el nivel de embalse y la coronación de la presa, se establece:

“En situaciones accidentales, se podría permitir que el agua superara el elemento impermeable si la coronación, el espaldón de aguas abajo, el talud y el pie de presa proporcionan la seguridad adecuada frente a la rotura. Las exigencias de resguardo no son aplicables a presas resistentes al sobrevertido”.

Los antecedentes más importantes de protecciones tipo repié se localizan hoy en día en Suecia, debido precisamente a la aplicación de su normativa de seguridad de presas. Los casos principales descritos en la bibliografía son los de las protecciones de las presas de Suorva (Foto 1), Seitevare, Trängslet y Hällby.



Foto 1. Construcción de la protección tipo repié de la presa de Suorva (Fuente: Nilsson 2004)

En la bibliografía consultada, los criterios de diseño sobre este tipo de protección se centran en evitar el arrastre de las piedras que lo forman, adoleciendo de estudios acerca de la estabilidad en masa una vez se hayan desarrollado las presiones intersticiales asociadas a la percolación. De esta forma, las protecciones normalmente conservan el mismo talud que el espaldón de la presa sobre el que descansan, a modo de manto de piedra de gran tamaño que permite evitar al arrastre para un caudal unitario prefijado.

2.2 Objetivos y metodología

El objetivo principal de la investigación consistió en definir criterios de diseño de protecciones tipo repié en presas de materiales sueltos con espaldón aguas abajo de escollera. La protección propuesta se compone de un relleno de material granular situado sobre el pie de aguas abajo de la presa y formado también por un material tipo escollera con características diferenciadas respecto a la escollera que integra el espaldón de la presa a proteger.

La función de la protección consiste en evitar que se produzcan deslizamientos en masa en el espaldón de la presa cuando un caudal de agua anormalmente elevado circula por su interior. La resistencia frente al arrastre o

la erosión interna no ha sido el objeto de la investigación, si bien se han incluido dentro de la metodología criterios existentes en la literatura técnica para completar el diseño, teniendo en cuenta estos mecanismos de rotura.

Esta circulación accidental de agua a través del espaldón de escollera, típicamente turbulenta, se ha denominado *percolación* (“*through-flow*”, en inglés) para diferenciarla del término *filtración*, habitualmente utilizado para designar el flujo laminar a través de un material fino. El fenómeno físico que origina la rotura del espaldón de escollera sometido a percolación accidental es complejo, entrando en juego gran cantidad de parámetros, muchas veces no deterministas, y con acoplamiento entre procesos, tanto de filtración como de arrastre y deslizamiento.

Durante la investigación se han combinado estudios experimentales y numéricos con objeto de analizar (Figura 2), para unos materiales de presa (tipo E) y repié (tipo E_b) de características dadas, la eficacia de la protección frente al deslizamiento en masa, teniendo en cuenta los principales parámetros que definen la geometría del repié: el ancho de berma (B), el talud exterior (N_b) y su altura máxima desde cimentación (H_b).

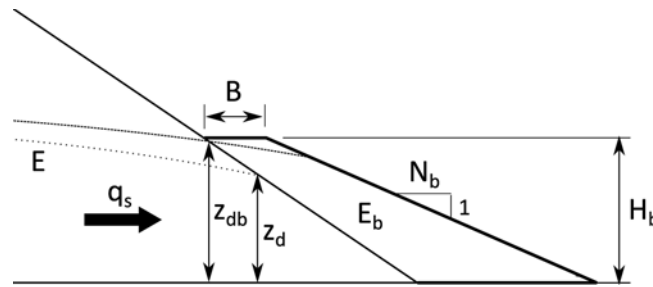


Figura 2. Esquema de los parámetros de diseño de la protección tipo repié

También se realizaron estudios particulares sobre factores con gran influencia en la percolación como son la anisotropía del material, motivada por la variación en vertical de la permeabilidad derivada de la compactación por tongadas, y el incremento de los caudales unitarios en el pie de presa debidos al estrechamiento de la cerrada en el fondo del valle.

A partir de los resultados obtenidos en las distintas campañas de modelación física y numérica se obtuvieron conclusiones respecto a la eficacia de este tipo de protección para evitar los daños provocados por percolación accidental en presas de escollera para un caudal de diseño determinado. El resultado fundamental de la investigación consistió en el procedimiento de diseño para este tipo de protecciones que fue validado posteriormente de forma experimental en laboratorio, a la escala del modelo físico.

2.3 Procedimiento de diseño

El procedimiento de diseño propuesto adopta una serie de simplificaciones que deben ser tenidas en cuenta a la hora de su aplicación. Así, la escollera se considera como un material granular, no cohesivo, isótropo, con valores de permeabilidad típicamente elevados, en el que la filtración queda gobernada por una ley de resistencia cuadrática. Así mismo, la cimentación se considera rígida y con una permeabilidad despreciable en comparación con la de la escollera.

El límite superior manejado para el caudal de diseño en este tipo de protecciones es aquél que llega a saturar por completo el espaldón de la presa a proteger y a partir del cual se inicia un patrón de circulación con flujo rasante de caudal en paralelo al talud de la presa a lo largo de toda su superficie exterior.

2.3.1 Datos

Los datos necesarios que requiere el procedimiento de diseño de la protección son:

- Caudal de diseño. Constituye el caudal de percolación que la protección ha de soportar sin que la presa resulte dañada.
- Geometría de la presa a proteger y de la cerrada en que se ubica.
- Propiedades del material del espaldón de la presa y de la escollera disponible para construir la protección.

- Coeficientes de la ley de resistencia parabólica del material de presa (E) y de protección (E_b) que relaciona el gradiente hidráulico (i) con la velocidad media de filtración (v):

$$i = a \cdot v + b \cdot v^2$$

- Ángulo de rozamiento interno del material de protección (ϕ_{Eb}).
 - Peso específico saturado de la escollera de protección ($\gamma_{Eb,sat}$).
 - Peso específico del agua (γ_w).
- Coeficiente de seguridad requerido frente al deslizamiento en masa (F).

2.3.2 Formulación del procedimiento

El procedimiento de diseño se estructura en los siguientes pasos:

1. Cálculo de la red de filtración del caudal de diseño a través del espaldón sin repié

Se ha de obtener la red de filtración con el caudal de diseño previsto y la ley de resistencia cuadrática característica del material de espaldón de la presa (E), obtenida a partir de los coeficientes a_E, b_E:

$$i = a_E \cdot v + b_E \cdot v^2$$

El modelo se puede llevar a cabo mediante un código libre de elementos finitos desarrollado por CIMNE en el marco del proyecto de investigación *EDAMS* (Larese et al. 2012, Rossi et al. 2012) denominado “*Edge-based LevelSet Problem Type*”¹, actualmente disponible para su descarga en la página web de *Kratos Multi-Physics*² y que ha sido desarrollado específicamente para simular, tanto en dos como en tres dimensiones, redes de filtración en materiales porosos con ley de resistencia cuadrática.

A partir de los resultados del modelo numérico, se determina (Figura 3) la altura de surgencia de la línea de saturación sobre el talud de la presa sin proteger (z_d) para el caudal de diseño (q_s), tomando como referencia la cota de cimentación de la presa.

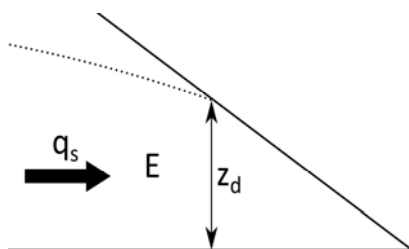


Figura 3. Altura de surgencia de la línea de saturación sobre el espaldón de la presa sin protección (z_d)

Esta altura (z_d) constituye el mínimo valor de la altura de la protección a partir del cual se iniciarán los tanteos de su valor definitivo (H_b), tras fijar el ancho de la berma (B) y el talud de la protección (N_b).

2. Ancho de berma (B)

El estudio sobre el efecto que produce el ancho de berma en la mejora de la estabilidad indica que este parámetro resulta poco relevante e incluso que su incremento puede llegar a ser contraproducente de cara a la estabilización del conjunto presa-repié. Por lo tanto, se recomienda determinarlo aplicando el criterio de mínimo constructivo que permita conseguir una correcta compactación con los medios mecánicos disponibles en la obra. El rango de referencia clásico para este valor en un caso real puede estar entre los 4 y 5 m al ser el ancho compatible para la circulación de la maquinaria de compactación.

3. Talud de la protección (N_b)

Se propone adoptar la hipótesis, ligeramente conservadora, de considerar que el repié se encuentra totalmente saturado cuando circula el caudal de diseño y que las presiones intersticiales desarrolladas son

¹

https://kratos.cimne.upc.es/attachments/download/658/HowToRunAnExample_EulerianFreeSurfaceCode_v1.zip

² <http://kratos-wiki.cimne.upc.edu/index.php/Download>

máximas (hidrostáticas) en su talud exterior. Adoptando esta hipótesis, el talud de diseño que garantiza la estabilidad se puede calcular mediante la aplicación de la formulación teórica (Toledo 1997) propuesta por Toledo y que ha sido validada experimentalmente en una campaña de ensayos específica realizada durante la investigación:

$$F = \frac{1}{\gamma_{Eb,sat}} \cdot \left(\gamma_{Eb,sat} - \frac{\beta \cdot \gamma_w}{\cos^2 \alpha} \right) \cdot \frac{\tan \varphi_{Eb}}{\tan \alpha}$$

siendo:

$$\beta = -0,32 \cdot N_b + 1,52 \cdot N_b - 0,77$$

si $1,5 < N_b < 2$.

$$\beta = 1$$

si $N_b > 2$.

F : coeficiente de seguridad frente al deslizamiento en masa

N_b : talud de la protección

$\gamma_{Eb,sat}$: peso específico saturado de la escollera

γ_w : peso específico del agua

φ_{Eb} : ángulo de rozamiento de la escollera de la protección

α : ángulo formado por el talud exterior del repié y la horizontal ($\tan \alpha = 1/N_b$)

A partir de la ecuación anterior se obtiene de forma inmediata el talud del repié ($N_b = 1/\tan \alpha$) que asegura la estabilidad con un determinado coeficiente de seguridad. Se recomienda que el coeficiente de seguridad a adoptar en el diseño de la protección sea relativamente estricto (1,1) dado que su funcionamiento está limitado a situaciones de emergencia.

4. Altura de la protección (H_b)

Su valor debe ser tal que las presiones intersticiales generadas por la percolación del caudal de diseño a través del conjunto presa-repié afecten exclusivamente a la estabilidad del talud exterior del repié que es el elemento que ha sido diseñado para soportar esta nueva solicitación. En cualquier caso, se debe comprobar que el talud de la presa que no queda cubierto por la protección no está sometido a presiones intersticiales que reduzcan su coeficiente de seguridad al deslizamiento. La determinación de la altura se realiza a partir del valor de z_d obtenido en el cálculo de filtración realizado en el primer apartado del procedimiento. Así, la altura de la protección se define como:

$$H_b = A \cdot z_d$$

El coeficiente adimensional A (mayor que 1) se puede estimar mediante el algoritmo de cálculo *Prepie.m* programado en código Matlab que se ha incluido dentro de la tesis doctoral. El algoritmo utiliza los datos de las leyes de resistencia de los materiales de presa y repié, el talud de la presa (N), el ancho de berma (B) y el talud del repié (N_b). Con el valor obtenido por el algoritmo se ha de realizar el cálculo de filtración del conjunto presa-repié con el caudal de diseño para obtener la nueva altura de la línea de saturación sobre el talud de la presa (z_{db} en la Figura 2). Este cálculo permite comprobar que la altura del repié es mayor que dicho valor z_{db} , en cuyo caso el valor obtenido por el algoritmo resulta adecuado.

2.3.3 Verificación experimental

La verificación experimental del procedimiento se ha realizado mediante la técnica de “ensayos ciegos”, diseñando previamente en gabinete distintas protecciones, formadas por dos combinaciones de materiales de presa y protección y dos caudales de diseño distintos en cada una de ellas. Los casos de protección, dimensionados conforme al procedimiento, fueron ensayados en laboratorio para comprobar o refutar la validez del método.

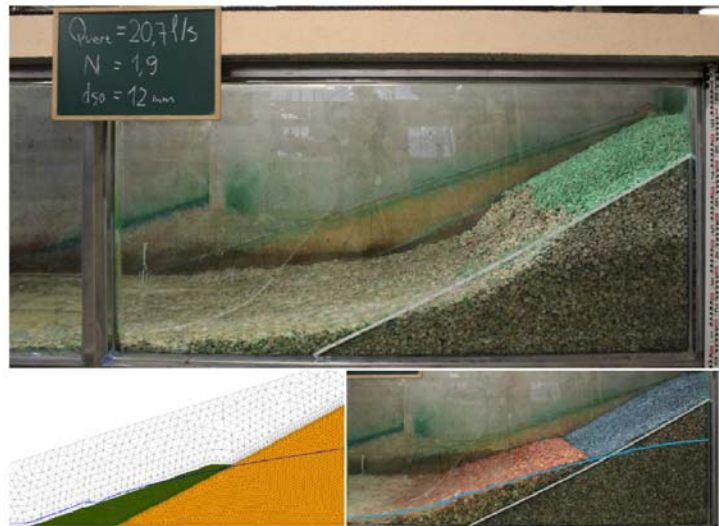


Figura 4. Montaje correspondiente a unos de los ensayos de validación del procedimiento de diseño. Foto superior: presa Desprotegida, con caudal unitario de percolación de 15,7 l/s/m. Figura inferior: modelo de filtración correspondiente al caudal de diseño (16 l/s/m). Foto inferior: protección con caudal de percolación $q_s=15,9$ l/s/m.

El procedimiento de diseño de la protección se consideró validado a la escala de ensayo al resultar exitosas las 4 pruebas realizadas.

2.4 Resumen y conclusiones

La principal conclusión de la investigación es que las protecciones tipo repié constituyen una protección eficaz para evitar el deslizamiento en masa de presas de escollera provocado por percolaciones accidentales en el interior de su espaldón de aguas abajo. El talud del repié constituye una variable fundamental en el diseño y depende principalmente de la resistencia al corte de la escollera utilizada para su construcción. La fórmula de dimensionamiento propuesta por Toledo para taludes de escollera en condiciones de saturación completa, que ha sido validada experimentalmente en esta tesis, resulta aplicable para el cálculo del talud del repié. El ancho de la berma, sin embargo, es una variable de escasa relevancia de cara a la mejora de la estabilidad.

El criterio para decidir el tamaño del material de repié debe ser el de evitar, para el caudal de diseño considerado, el arrastre provocado por las velocidades de filtración producidas a la salida del agua por la superficie externa del talud. En caso de que, para evitar el arrastre, se requieran tamaños de piedra demasiado elevados, se puede optar por una solución zonificada, con una capa externa de protección tipo “*riprap*” de piedra más gruesa que cumpla con esta función. El material del repié debe ser autoestable y de elevada permeabilidad en relación al material de la presa. También debe cumplir con la condición de filtro respecto al material del espaldón de la presa a proteger y, de no ser así, se deben añadir las capas de transición necesarias entre presa y repié para conseguir la estabilidad interna del conjunto.

Dentro de la investigación, se ha incluido como resultado complementario una metodología para la calibración de la ley de resistencia no lineal del material tipo escollera que permite su aplicación *in situ* en casos reales, en la propia obra, mediante un pedraplén de ensayo instrumentado con piezómetros y un aforo del caudal filtrado.

El campo de aplicación de esta tecnología puede abarcar, entre otras, las siguientes obras:

- Mejora de la seguridad de presas de escollera existentes de elevado riesgo potencial, o de especial vulnerabilidad frente al sobrevuerto, la erosión interna, o al rebase por oleaje debido al viento o sismos;
- ataguías rebasables de escollera;
- aliviaderos de emergencia.

3 Aplicación de la protección mediante BFC's en el aliviadero de la presa de Barriga (Burgos)

La presa de Barriga se localiza en el Valle de Losa (Burgos). Está formada por un cuerpo de presa de escollera impermeabilizado exteriormente mediante lámina de PEAD. Se trata de una presa de una altura moderada (17 m) que genera un embalse de unos 0,5 hm³ para su uso en regadío. Desde el punto de vista ingenieril, su peculiaridad principal la constituye el aliviadero que, además de estar situado sobre el propio cuerpo de la presa, tiene un canal de descarga formado por BFC's dispuestos sobre su talud de aguas abajo. Esta obra constituye la primera referencia mundial de un aliviadero de este tipo en una gran presa en explotación. Durante el proyecto de construcción se realizaron investigaciones para certificar la eficacia de la solución, que se prolongaron durante casi dos años, con la intervención de los equipos de mayor experiencia en el funcionamiento de esta tecnología a nivel internacional. La presa lleva en funcionamiento desde 2007, y ya ha estado sometida a varios episodios de vertido (Foto 2) con resultado satisfactorio.



Foto 2. Presa de Barriga durante el vertido de mayo de 2008 (Fuente: José Manuel Ruiz)

En el texto se resumen las características más importantes de la obra, incluyendo los detalles más relevantes del bloque finalmente utilizado, las diferencias respecto al bloque usado como referencia, bajo patente del Bureau of Reclamation norteamericano, así como aspectos relevantes sobre su puesta en obra y del diseño global del aliviadero. Finalmente, se presenta el proyecto de investigación oficial denominado *ACUÑA* perteneciente al Plan Nacional de I+D, que da continuidad al estudio de la tecnología y que tiene como objetivo la optimización de formas de los BFC's desde un punto de vista hidráulico y la mejora de sus características resistentes de cara desarrollar un nuevo prototipo industrial de BFC y una metodología para el proyecto, construcción y explotación de aliviaderos escalonados con este tipo de protección modular.

3.1 Introducción y antecedentes

El fundamento de la tecnología de protección con aliviaderos en forma de cuña se basa en el campo de presiones característico de los aliviaderos escalonados sometidos a flujo rasante. La circulación del agua a gran velocidad produce inmediatamente aguas abajo de la contrahuella una zona de depresiones aguas arriba de la zona de caída del chorro, donde se vuelven a producir presiones positivas. Los orificios situados en la contrahuella transmiten la presión negativa al contacto entre el bloque y la base de apoyo, originando una succión estabilizadora entre ambos. Los ensayos realizados hasta la fecha demuestran la estabilidad hidráulica de la solución.

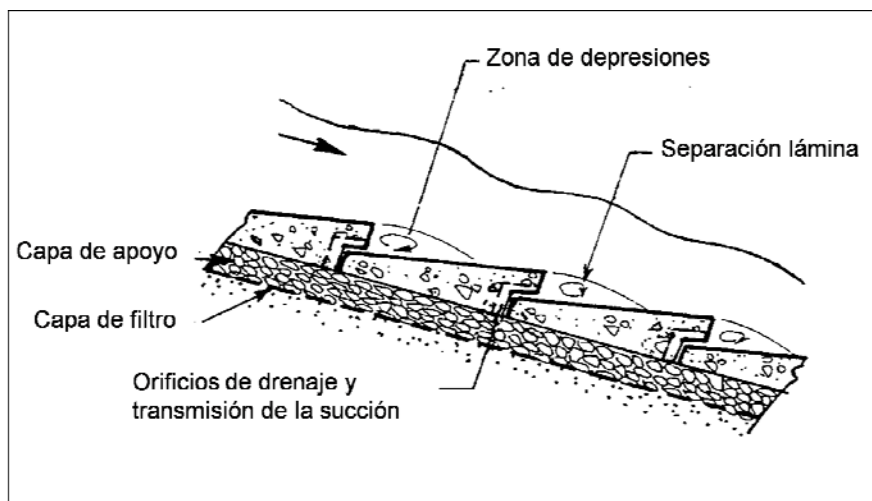


Figura 5. Croquis de funcionamiento de los bloques en forma de cuña. (Fuente: C. Matías. 2004)

La disposición estructural mediante bloques independientes hace que el revestimiento se adapte con facilidad a los asientos habituales de las presas de materiales sueltos, eliminando de esta forma los problemas inherentes a las protecciones con revestimientos rígidos.

La idea original de esta tecnología y los primeros trabajos con este tipo de protección comenzaron en los años 70 en el Instituto de Ingeniería Civil de Moscú (URSS) dirigidos por el profesor Yuri Pravdivets. Es en este país donde se construyen los primeros modelos a escala (1:100, 1:50 y 1:6) y diversos prototipos como el construido sobre el río Dniéper (Pravdivets, Slissky 1981), con condiciones de funcionamiento extremas, con cargas hidráulicas de 35 m y caudales unitarios de 60 m²/s.

El profesor R. Baker, de la Universidad de Salford (Reino Unido), continúa el desarrollo de la tecnología con nuevos estudios (Baker, Gardiner 1995) que culminan con la construcción de un prototipo en la presa de Brushes Clough (Greater Manchester) (Baker, Gardiner 1994) y la redacción de un manual de diseño publicado por el Construction Industry Research and Information Association (CIRIA) (Hewlett et al. 1997). El caudal unitario máximo ensayado en la presa de Brushes Clough fue 2,2 m²/s circulando sobre un talud igual a 3.

El Bureau of Reclamation norteamericano ha realizado ensayos en modelo físico en el canal de ensayo que dispone la Colorado State University (en adelante CSU) en Fort Collins (Colorado), con un talud de 2 y caudales unitarios máximos por encima de los 4 m²/s. De estas experiencias ha surgido una patente de bloque para EE.UU. denominada ArmorwedgeTM, basada en esta misma tecnología.

El Instituto Superior Técnico junto al Laboratorio Nacional de Engenharia Civil de Lisboa (en adelante LNEC) mantienen actualmente abierta una línea de investigación sobre este tipo de tecnología.

Las referencias de instalaciones en prototipo recogidas en el manual de diseño de CIRIA, todas ellas previas a la construcción de la presa de Barriga, son: Bolshevik, Klinbeldin, Maslovo, Sosnovski, Central Hidroeléctrica en el Dniéper, Dneister, Kolyma, Transbaikal, Jelyevski, en la antigua URSS; Jiangshe Wanan, en China; Wadi Sahalnawt, en Omán y Brushes Clough en Reino Unido.

En España se dispone de referencias de aliviaderos sobre presas de materiales sueltos, como pueden ser la presa del Molino de la Hoz o la presa de Llodio, si bien en estos casos la protección ha sido realizada mediante losas convencionales de hormigón armado.

3.2 El aliviadero de la presa de Barriga

La cuenca de aportación de la presa de Barriga es de unos 20 km². El río tiene un régimen típicamente torrencial, con caudales escasos o nulos en periodos de descarga del acuífero y aportaciones bruscas en invierno, cuando el acuífero está recargado, especialmente intensas cuando se combinan con episodios de deshielo. El caudal en avenida de proyecto es de 161 m³/s y de 229 m³/s en avenida extrema resultando la capacidad de laminación del embalse prácticamente despreciable.

3.2.1 4. Embocadura

La embocadura del aliviadero tiene unas características particulares y su diseño fue validado en un ensayo en modelo físico a escala reducida en el LNEC. En planta, su geometría se define por una transición mediante abocinamiento elíptico que enlaza con el tramo recto del canal de alimentación de sección trapezoidal (Figura 6). La anchura de la entrada, medida sobre la losa, pasa de 35,8 m a 20 m. La losa inferior es horizontal y los taludes laterales de la sección trapezoidal tienen un valor de 2. El conjunto de la embocadura hasta el inicio del canal de descarga se construyó en hormigón armado.

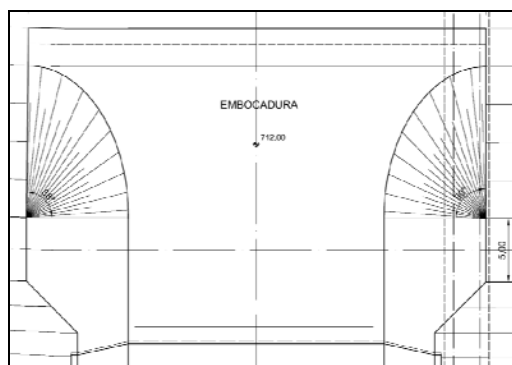


Figura 6. Vista en planta de la embocadura del aliviadero con las transiciones elípticas

3.2.2 Canal de descarga

El canal de descarga, de sección trapezoidal, de 20 m de anchura en el fondo, está formado por filas de BFC's. El fondo del canal es paralelo al talud aguas abajo de la presa, a 2 m de distancia del talud teórico del espaldón. Los taludes laterales que delimitan la sección transversal se protegen también con bloques y tienen un valor de 2.

El diseño y fabricación del bloque finalmente utilizado fue realizado durante la construcción de las obras. Inicialmente se partió del bloque estándar tipo ArmorwedgeTM que fue el ensayado (Thornton, Robeson, M.D., Varyu, D.R. 2006) en modelo físico en la instalación al aire libre de la CSU y que se tomó como diseño de referencia partir del cual se realizaron las modificaciones que dieron origen al bloque dispuesto en la presa de Barriga (Armortec Erosion Control Solutions 2006). Las diferencias principales entre ambos se presentan en la Tabla 1.

	Armorwedge TM	Bloque de Barriga
Dimensiones máximas	45,7 x 30,4 x 13,0.	73,0 x 50,0 x 20,0.
Masa	22,7 Kg	111,0 Kg
Ranuras de aireación	3 de 3,8 x 1,3 cm ²	3 de 5,0 x 2,0 cm ²
Tipo de hormigón	HM20 en vía seca	HM50 en vía húmeda
Orificio transversal	No	Sí. Ø 22 mm
Contornos laterales	Superficies laterales verticales	Superficies laterales convergentes para desmolde

Tabla 1. Diferencias entre el bloque tipo ArmorwedgeTM y el utilizado en la presa de Barriga

Las modificaciones realizadas tenían como objetivo principal mejorar la seguridad global de la presa. La justificación técnica del cambio en las dimensiones de la pieza se basó en el factor de escala (1,6) entre los calados de proyecto y los que se pudieron llegar a ensayar en el canal de CSU (Frizell 2007). Además, estas dimensiones mejoraban la resistencia a los ciclos hielo-deshielo y la seguridad frente a posibles sabotajes o vandalismo. En el ensayo de CSU se realizó una medida de la fuerza necesaria (entre 200 kp y 1000 kp, para el bloque ArmorwedgeTM de 22,7 kp de peso) para extraer un bloque de su ubicación una vez colocado. La mejora de la calidad del hormigón permitió aumentar la resistencia al impacto, importante para soportar posibles golpes de cuerpos flotantes.

Se añadió un orificio interno, transversal al bloque, que hizo posible incluir en su interior un cable para solidarizar cada bloque con los de su misma fila, dificultando su posible extracción por causas imprevistas. Este orificio resultó útil para el transporte y colocación del bloque durante la obra. La convergencia de las caras laterales opuestas y el remate redondeado de las aristas se adoptaron para facilitar el desmolde de las piezas y para evitar la rotura de los bordes en arista viva.

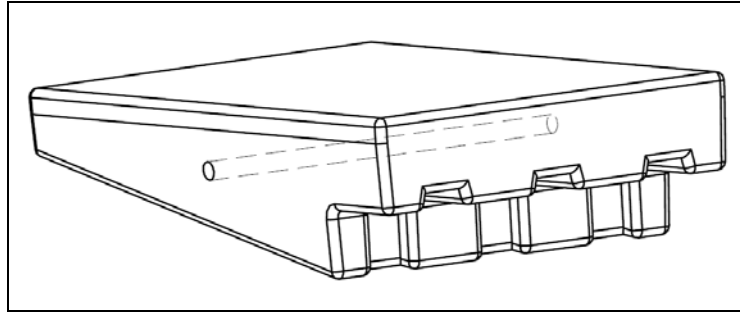


Figura 7. Vista 3D del bloque del aliviadero de Barriga. (Fuente: Armortec, Inc.)

La disposición de los bloques entre filas sucesivas se realizó de tal forma que no coincidieran las juntas correspondientes a hileras consecutivas para disminuir las filtraciones en estos planos. Para ello se utilizaron medios bloques en los extremos de filas alternas.

Los puntos singulares que forman las uniones entre las distintas zonas de protección se corresponden con la unión entre la solera y los taludes del canal de descarga; la embocadura y el canal de descarga (en la parte superior del canal), y el canal de descarga y el trampolín (en la parte inferior del canal). Este aspecto fue objeto de análisis durante la fase de diseño y, tras el estudio de referencias anteriores y su discusión por parte del equipo de proyecto, se decidió optar por las siguientes soluciones:

Unión entre solera y taludes. Se diseñó mediante un cordón de hormigón armado con juntas cada 3 m, dando continuidad al escalonado de ambos planos (Figura 8, izquierda).

Unión entre embocadura y canal de descarga. El objetivo era que la fila de bloques situada aguas arriba quedara fijada en su extremo superior por la losa de homigón armado, iniciando desde este punto el escalonado y buscando la orientación adecuada en la salida para evitar despegues de la lámina (Figura 8, derecha).

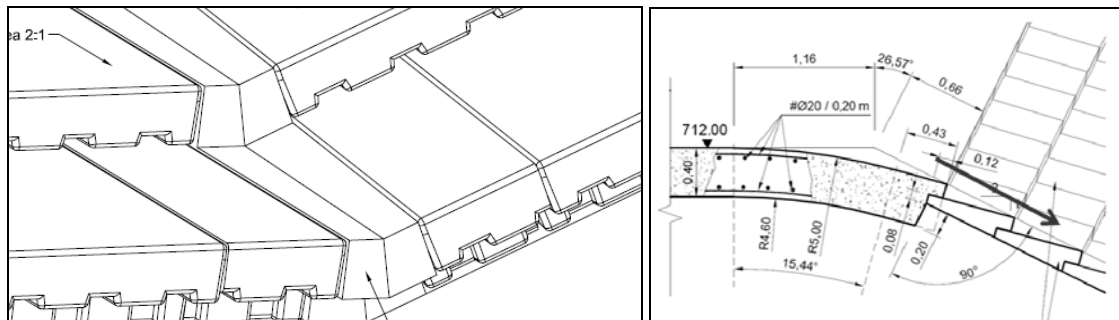


Figura 8. Izquierda: unión entre solera y taludes. Derecha: unión entre la embocadura y el canal de descarga.

Unión entre canal de descarga y trampolín. La fila inferior de bloques queda apoyada sobre el trampolín de lanzamiento que restituye los caudales al río. Para su ejecución se dejó una hendidura en la zona de encuentro del trampolín donde, una vez nivelada, se recibió la fila de bloques con mortero de cemento (Figura 9). Una vez colocada esta primera fila se dispusieron sucesivamente el resto, de abajo a arriba.



Figura 9. Unión entre canal de descarga y trampolín

Los bloques se apoyaron sobre una capa de material granular diseñada para cumplir varias funciones: conseguir la regularización de la superficie de apoyo del bloque, drenar los caudales filtrados por las juntas entre bloques y cumplir con la condición de filtro del material del cuerpo de presa para evitar la migración de partículas a causa de la succión. A su vez, se comprobó que el material del cuerpo de presa cumplía la condición de filtro respecto al material de apoyo de los bloques. En caso contrario, hubiera resultado necesario disponer una transición entre ambas zonas.

3.2.3 Restitución del agua al cauce

La restitución del agua al cauce se realizó mediante un trampolín de lanzamiento. El trampolín, cuyo diseño se basa en la idea original del profesor Alfonso Álvarez, cumple con otras funciones relacionadas con la estabilización y drenaje del cuerpo de presa. Con esta solución se pretendió separar hidráulicamente la restitución al río de los bloques que forman el canal de descarga, de modo que los bloques estuvieran sometidos exclusivamente al flujo de caídas sucesivas o rasante, y en ningún caso a turbulencias originadas por el dispositivo de disipación de energía para la restitución del agua al río.

El trampolín se apoyó sobre 6 grandes bloques de hormigón en masa, cuatro en su parte central y dos en los extremos. Entre ellos, se dispusieron unos huecos de drenaje que fueron rellenos con escollera de gran tamaño (Foto 3). Estos grandes orificios facilitan el drenaje de los caudales que pudieran filtrarse a través del aliviadero o por una posible pérdida de estanqueidad en la impermeabilización de la presa. Se comprobó que la capacidad de drenaje quedaba asegurada incluso en situación de avenida extrema, al quedar el nivel del agua en tal caso por debajo de la cota superior de los orificios. Con ello se trataba de evitar el desarrollo de subpresiones que desestabilizaran las filas inferiores de BFC's. Las formas de los bloques laterales del trampolín tienen la función de orientar la salida del agua hacia el cauce para evitar erosiones en las márgenes del río.



Foto 3. Imagen del trampolín de restitución con los orificios de drenaje de escollera y los de aireación en los dientes de reparto

Los ensayos en modelo reducido de lecho móvil realizados en el LNEC se plantearon para extraer conclusiones acerca de los daños que podría producir la erosión aguas abajo del trampolín, sobre la orientación y dispersión lateral del manto de agua y el remanso producido por el puente existente aguas abajo de la presa. Como consecuencia del análisis del modelo se decidió añadir al diseño 5 dientes de reparto de caudal (Foto 3). Con ello se consiguió reducir la erosión en casi un 50%. Los dientes se equiparon con unos tubos de aireación para mejorar el funcionamiento hidráulico del lanzamiento. Según los resultados de los ensayos, el lanzamiento se produce con caudales por encima de los 12 m³/s, y deja de producirse alrededor de los 10 m³/s cuando los caudales van decreciendo, comprobándose la histéresis del fenómeno de lanzamiento en los trampolines.

3.3 Líneas de investigación: el proyecto ACUÑA

La experiencia adquirida durante la construcción de la presa de Barriga puso de manifiesto la necesidad de aumentar el conocimiento sobre este tipo de aliviaderos. Además de la optimización de las características particulares del bloque, como pueden ser su geometría, fabricación, resistencia al impacto, durabilidad, etc., durante la obra surgieron múltiples cuestiones relativas al diseño del aliviadero de las que no se encontraron referencias ni criterios de diseño en la literatura técnica.



Foto 4. Instalación experimental del proyecto ACUÑA

Esta realidad, unida al interés que despertó esta tecnología por las grandes posibilidades que abre en el campo de las protecciones de presas, llevó a proponer al Ministerio de Ciencia e Innovación la financiación de un proyecto de investigación aplicada centrado en primer instancia en la optimización del BFC para obtener un nuevo prototipo de bloque con características mejoradas. Este proyecto, de acrónimo ACUÑA, fue aprobado en 2011 y está en marcha en estos momentos.

En el futuro, una vez finalizada la investigación sobre la optimización del bloque, se prevé continuar con la línea de investigación centrando el objetivo en formular criterios de diseño globales de aliviaderos mediante BFC's.

3.4 Resumen y conclusiones

El trabajo realizado en el diseño y construcción del aliviadero de la presa de Barriga ha permitido conocer la problemática global de este tipo de tecnología. Ha sido necesario investigar acerca del proceso de fabricación de los bloques, sus materiales, el control de calidad, la puesta en obra, el dimensionamiento de las capas de apoyo de los bloques y las uniones entre las distintas partes del aliviadero. Como conclusión general se puede hablar de una solución prometedora, que si bien tiene todavía un campo de aplicación necesariamente acotado, permite pronosticar una ampliación en un futuro próximo. El campo de aplicación actual puede ser:

- Protección de taludes de presas de materiales sueltos para mejora de la seguridad frente al sobrevertido;
- aliviaderos de emergencia para ampliar la capacidad de desagüe de aliviaderos de presas existentes, con caudales de avenidas extraordinarias;
- aliviaderos de servicio de balsas o presas con pequeñas superficies de cuenca;
- aliviaderos de servicio de presas de tamaño moderado.

4 Conclusiones finales

En el futuro inmediato, los ingenieros de presas debemos afrontar el reto que nos demanda la sociedad: mejorar las condiciones de seguridad de un parque de presas de avanzada edad con unos recursos económicos cada vez más limitados.

La respuesta a este reto requiere de nuevos enfoques y, en algunos casos, la adopción de soluciones innovadoras, poco convencionales, que permitan conseguir los objetivos perseguidos con eficiencia de costes. Una correcta planificación llevará a conseguir el primer objetivo: priorizar entre las distintas actuaciones, empezando por aquellas que resulten más urgentes. El paso siguiente requerirá de la optimización económica del conjunto de las soluciones propuestas. En la medida en que esto se consiga se podrán alcanzar en un plazo razonable los niveles mínimos de seguridad que debemos garantizar en las presas existentes.

Las tipologías de protecciones presentadas en este artículo responden a este esquema, tratando de ampliar el conocimiento acerca de tecnologías que permitan mejorar la seguridad de nuestras presas con un criterio de racionalidad económica.

5 Agradecimientos

Al Ministerio de Ciencia e Innovación por su apoyo en la financiación de los siguientes proyectos de investigación:

“ROTURA DEL ELEMENTO IMPERMEABLE DE PRESAS DE MATERIALES SUELTOS EN SITUACION DE SOBREVERTIDO Y ANÁLISIS DE PROTECCIONES COMBINANDO MODELACIÓN FÍSICA E INTELIGENCIA ARTIFICIAL” de código BIA2010-21350-C03-03, perteneciente a la convocatoria de 2010 del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del Subprograma de Proyectos de Investigación Fundamental No Orientada.

“DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE BLOQUE EN FORMA DE CUÑA Y DE LA METODOLOGÍA PARA SU USO COMO PROTECCIÓN FRENTE A LA EROSIÓN EN PRESAS O BALSAS DE MATERIALES SUELTOS” de código IPT-2011-0997-020000, perteneciente a la convocatoria de 2011 del Plan Nacional de I+D+i 2008-2011, dentro del Subprograma INNPACTO.

6 Referencias

6.1 Protecciones tipo repié

ICOLD, 1995. Bulletin 99. Dam Failures Statistical Analysis. Paris, Francia: International Committee on Large Dams.

LARESE, A., ROSSI, R., OÑATE, E. e IDELSOHN, S., 2012. A coupled PFEM–Eulerian approach for the solution of porous FSI problems. *Computational Mechanics*, , pp. 1-15.

MINISTRY OF PETROLEUM AND ENERGY. ENERGY WATER RESOURCES DEPARTMENT., 2000. Regulations governing the safety and supervision of watercourse structures. Noruega.

MORÁN, R., 2013. Mejora de la seguridad de las presas de escollera frente a percolación accidental mediante protecciones tipo repié. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid.

MORÁN, R., CAMPOS, H., GARCÍA, J. y TOLEDO, M.A., 2011. Estudio de protecciones frente al sobrevertido de presas de materiales sueltos mediante repié de escollera. *Dam Maintenance & Rehabilitation II*. Zaragoza, España: CRC Press. Taylor & Francis Group. Balkema 2010, .

MORÁN, R. y TOLEDO, M.A., 2009. Protección de presas de materiales sueltos frente al sobrevertido mediante repié de escollera, *Actividad Experimental de I+D+ i en Ingeniería Hidráulica en España. Seminarios 2009.*, 18/06/2009 2009, pp. 120-121.

MORÁN, R. y TOLEDO, M.A., 2011. Research into protection of rockfill dams from overtopping using rockfill downstream toes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**(12), pp. 1314-1326.

NILSSON, Å., 2004. RIDAS Tillämpningsvägledning – Fyllningsdammar. Utvikling av tillämpningsvägledning for fyllingsdammer i Sverige, *Proceedings of the NNCOLD Fagseminar 2004*.

ROSSI, R., LARESE, A., DADVAND, P. y OÑATE, E., 2012. An efficient edge-based level set finite element method for free surface flow problems. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.

SVENSK ENERGI, 2007. Ridas. Directrices de seguridad de presas en Suecia. RIDAS - kraftföretagens riktlinjer för dammsäkerhet.

TOLEDO, M.A., 1997. Presas de escollera sometidas a sobrevertido. Estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa. Tesis doctoral., Universidad Politécnica de Madrid.

TOLEDO, M.A., 1997. Embankment Dams Slip Failure Due to Overtopping, Proceedings of the 19th ICOLD Congress, Florencia, Italia, 1997.

6.2 Bloques en forma de cuña

ARMORTEC EROSION CONTROL SOLUTIONS 2006, Pre-cast concrete units. Barriga dam project. Burgos. Spain., Submittal documents edn. (Confidencial)

BAKER, R. & GARDINER, K. 1994, "Construction and performance of a wedge block spillway at Brushes Clough reservoir", Proceedings of the 8th Conference of the British Dam Society on Reservoir Safety and the Environment Thomas Telford Services Ltd, Exeter, UK, pp. 214.

BAKER, R. & GARDINER, K.D. 1995, "Building blocks", International Water Power and Dam Construction, vol. 47, no. 11, pp. 2.

COUTO, T.L., PINTO, A., TOLEDO, M.A. y MORÁN, R., 2007. A new solution for a concrete spillway over a rockfill dam. Hydraulic model study of Barriga Dam in Spain. In: C. PINA, E. PORTELA and J. PEREIRA, eds, Proceedings of the 5th International Conference on Dam Engineering. Lisboa, Portugal: LNEC, pp. 139-146.

FRIZELL, K.H. 2007, ArmorwedgeTM analysis report: block size scaling and bedding information. (Confidencial)

HEWLETT, H., BAKER, R., MAY, R. & PRAVDIVETS, Y.P. 1997, Design of stepped-block spillways, Construction Industry Research and Information Association, London, U.K.

LNEC 2006, Presa de Barriga. Estudo hidráulico em modelo reduzido do descarregador de cheias, Lisboa, Portugal. (Confidencial)

MORÁN, R., TOLEDO, M.A., SEVILLA, J.L. y GARCÍA, J., 2008. Aliviadero con bloques en forma de cuña sobre la presa de Barriga (Burgos). VIII Jornadas Españolas de Presas. Córdoba.

PRAVDIVETS, Y.P. & SLISSKY, S.M. 1981, "Passing floodwaters over embankment dams", International Water Power and Dam Construction, vol. 33, no. 7, pp. 30-32.

THORNTON, C.I. & ROBESON, M.D., VARYU, D.R. 2006, ArmorwedgeTM Data Report 2006 Testing for Armortec Erosion Control Solutions, Inc. (Confidencial)